

電熱と流動制御に基づく鋼の連続鑄造用モールドフラックスの組成設計に関する研究

| | |
|--------|---|
| 著者 | 渡辺 圭児 |
| 号 | 58 |
| 学位授与機関 | Tohoku University |
| 学位授与番号 | 工博第004949号 |
| URL | http://hdl.handle.net/10097/58871 |

| | |
|-----------|--|
| 氏 名 | わた なべ けい じ |
| 授 与 学 位 | 博士（工学） |
| 学位授与年月日 | 平成 26 年 3 月 26 日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第 4 条 1 項 |
| 研究科、専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科（博士課程）金属フロンティア工学専攻 |
| 学位論文題目 | 伝熱と流動制御に基づく鋼の連続铸造用モールドフラックスの組成設計に関する研究 |
| 指 導 教 員 | 東北大学教授 長坂 徹也 |
| 論文審査委員 | 主査 東北大学教授 長坂 徹也 東北大学教授 北村 信也 東北大学教授 柴田 浩幸 |

論文内容要旨

第 1 章 緒言

連続铸造プロセスの生産性向上させるために、主に铸造速度の増加が必要となる。そのための課題としては、鑄片と鑄型間の潤滑不良によるブレイクアウトと呼ばれる未凝固溶鋼の外部流出トラブルを発生させないこと、および製品の品質を確保することが挙げられる。本研究の目的は、モールドフラックスの最適化により、これら課題を解決し、連続铸造の生産性を向上させることである。鋼種により、生産性向上へのアプローチが異なるため、中炭素鋼用フラックスについては 2 章で、低炭・極低炭素鋼用フラックスについては第 3、4 章で述べる。

第 2 章 連続铸造鑄型内伝熱へ及ぼすモールドフラックスの結晶化挙動の影響

中炭素鋼は、鑄型内の熱流束増加につれて鑄片の縦割れ性欠陥が増大する傾向があり、その対策として、結晶化しやすいフラックスを使用することで、鑄型内は緩冷却化され、縦割れが抑制されることが知られている。従来は、ガラス化し易いフラックスと結晶化し易いフラックスを比較することで、結晶化による緩冷却機構が評価されてきた。本研究では、高塩基度（CaO/SiO₂>1.4）、高結晶化フラックス間での比較を行うことで、結晶化の程度の緩冷却へ及ぼす影響について検討した。また、最も結晶化し易いフラックスを使用して実機評価を行った。

実験に使用したフラックス組成を表 1 に示す。熱電対を取り付けた水冷銅板を熔融フラックスへ浸漬する試験を行った結果、塩基度が同程度でも、CaO, F の含有量が高いフラックスはより急冷される銅板側においても結晶化しやすいことが分かった。結晶化による収縮に伴い、銅板側表面に凹凸が発現。その結果、銅板とフラックスフィルム間のエアギャップが増大し、界面部の熱抵抗も増大（図 1）、緩冷却となることを明らかにした。塩基度が同程度でも、結晶生成中の残融液体

表1 フラックスの組成と特性

| フラックス | | A | B | C |
|--------------------|--------------------------------|------|------|------|
| 化学組成 (wt%) | SiO ₂ | 28.3 | 28.9 | 30.4 |
| | Al ₂ O ₃ | 3.5 | 3.5 | 3.1 |
| | CaO | 40.3 | 42.5 | 44.3 |
| | F | 8.9 | 10.3 | 10.9 |
| | MgO | 1.7 | 2.6 | 0.8 |
| | Li ₂ O | 3.0 | 3.0 | 3.1 |
| | 合計 | 85.7 | 90.8 | 92.6 |
| | CaO/SiO ₂ | 1.42 | 1.47 | 1.46 |
| 粘度 (Pa・s at 1573K) | | 0.05 | 0.06 | 0.05 |
| 結晶化温度 (K -10K/min) | | 1415 | 1398 | 1418 |

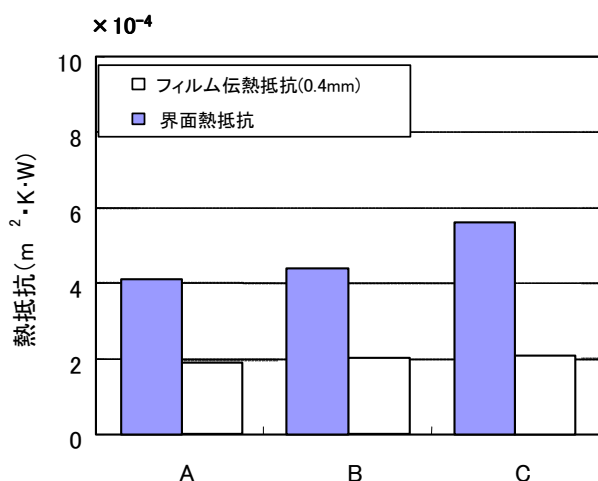


図1 界面熱抵抗とフィルムの伝熱抵抗の比較(浸漬30秒)

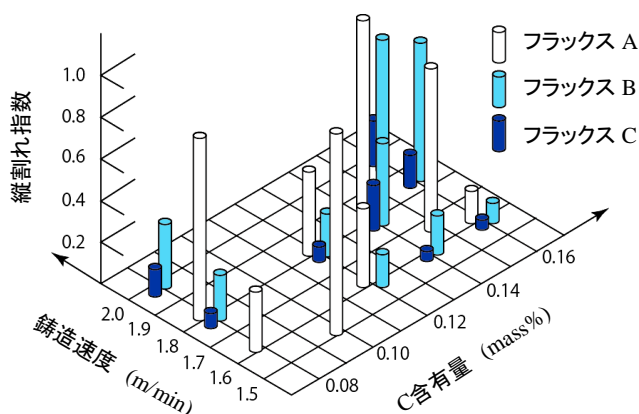


図2 実機試験による縦割れ性欠陥評価

(過冷却液体)部の粘性は、CaO, F 等のシリケートネットワークを切断する成分が多いほど低下し、その結果、結晶核生成速度が増大し、結晶化しやすくなったものと推定される。このフラックスを使用して実機にて鑄造試験を実施したところ、鑄型内熱流束は従来より 15-20%低減し、縦割れ指数も低減することを確認できたため(図2)、鑄造速度を 1.2m/min から 1.6m/min へと 0.4m/min 増速し生産性を向上させることが可能となった。

第3章 モールドフラックスの溶鋼中への巻込みに及ぼすフラックス物性の影響

低炭・極低炭素鋼においては、その品質上の最大の課題は、フラックスの巻込みである。フラックスの粘性を増大させることで、その巻込みが抑制されることは、水モデル試験、実機試験にて知られている。一方、連続鑄造の高速化における重要課題であるブレイクアウトを抑制するためには、その粘性を小さくする必要があり、これら相反する要求特性の兼ね合いでフラックスの粘性が設計されることになる。フラックスの巻込み抑制には、溶鋼/フラックス間の界面張力も影響を及ぼす可能性があることが知られていたが、定量的な抑制効果について、検討されていない。そこで、粘度および、溶鋼/フラックス間の界面張力の巻込みへ及ぼす影響を定量化し、界面張力増加による巻込み抑制の可能性を検討した。

初めに水の上に特性の異なるオイルを浮かべ、予め浸漬させたガラス管より、そのオイルの吸い込み易さを評価する手法により、粘性、界面張力両者が巻込みに影響することを明らかにした。次に溶

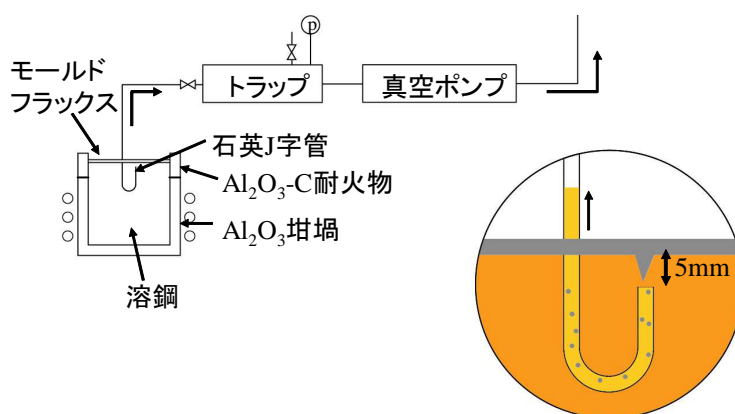


図3 溶鋼/フラックス系における吸い込み試験

鋼上にフラックスを使用した系で同様の試験を実施した(図3)。溶鋼試験における粘性と界面張力に対して、その巻き込み量を評価した結果を図4に示す。溶鋼試験においても、粘度、界面張力が増大するほどオイルまた

は、フラックスが巻込み難くなることが確認されたが、実機で一般的に使用される粘度 $0.5\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下、界面張力 $1200\text{--}1300\text{mN/m}$ においては、粘度の影響が支配的であり、界面張力の制御で巻込みを抑制させることが難しいことが明らかとなった。溶鋼試験におけるその巻込み量は以下の式で整理される。

$$m = 1.3 \times 10^7 \eta^{-0.24} \gamma_{s-m}^{-2.2}$$

m : 巻込み量 ($\text{g}/100\text{g}\text{-steel}$)、 η : フラックス粘性 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)、 γ_{s-m} : 界面張力 (mN/m)

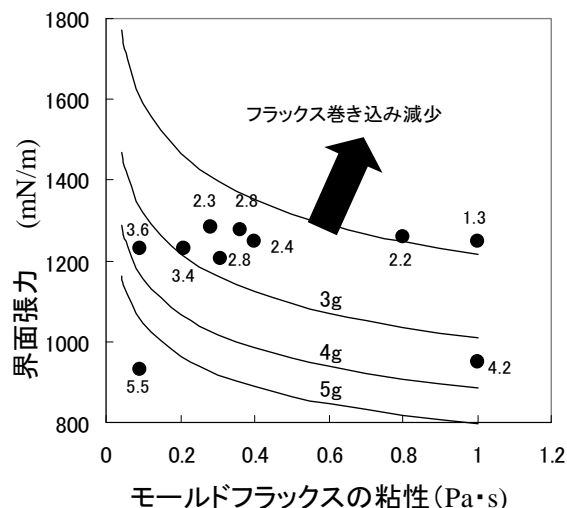


図4 溶鋼/フラックス系吸い込み試験における粘度、界面張力とフラックス巻き込み量の関係

第4章 難巻込みフラックスの開発

そこで、粘度の制御により、潤滑と難巻込みを両立させる可能性について検討した。フラックスの潤滑は、鋳片と鋳型の 1mm に満たない隙間にフラックスが流入することにより生じるが、その場所においては、オシレーションと鋳片の下向きへの動きにより、フラックスには $125\text{--}166\text{ (1/s)}$ と大きな速度勾配 (せん断速度) が生じている。一方、巻込みは、比較的ゆるやかな溶鋼流やその流れによって生じた渦により巻き込まれるため、その場所での速度勾配は 20 (1/s) と小さい (図 5)。そこで、せん断速度が小さい場合 (巻込み部) は粘度が高く、大きい場合 (潤滑部) は粘度が低い非ニュートン特性 (擬塑性) を示すフラックスとすることで、潤滑と難巻込みを両立させるフラックスの開発を行った。

窒素を加えたスラグ系で、擬塑性発現は既知のため、フラックスに窒化珪素を添加することで、その粘性挙動

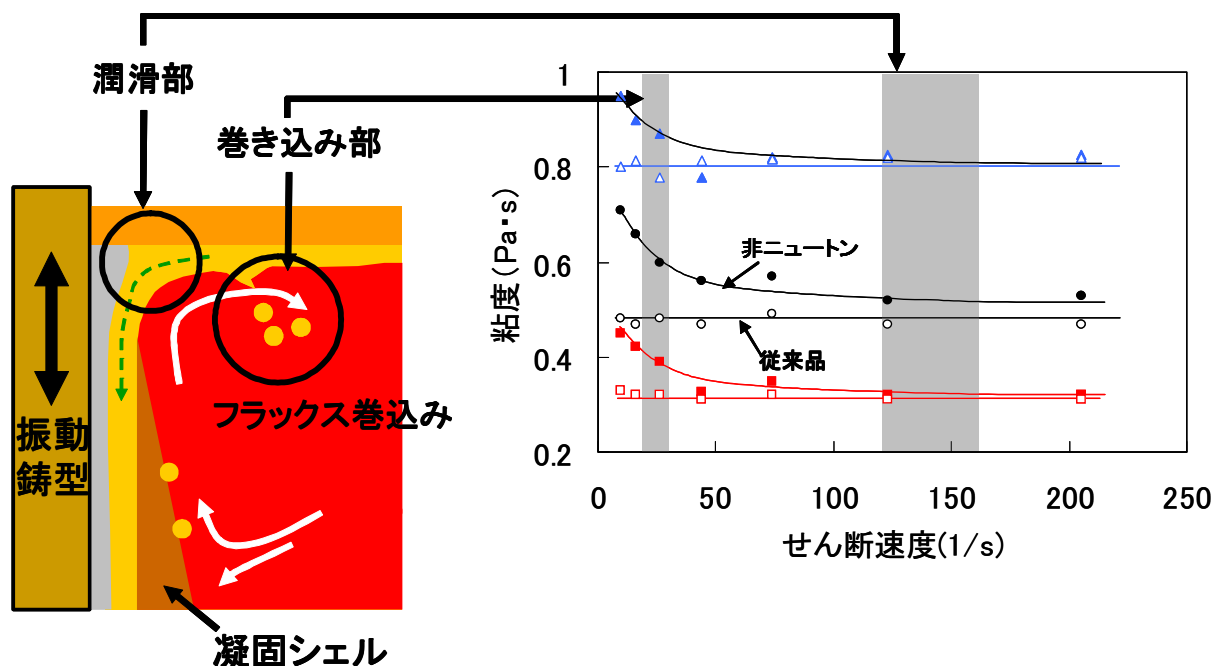


図5 フラックス粘度のせん断速度依存性 (1573K)

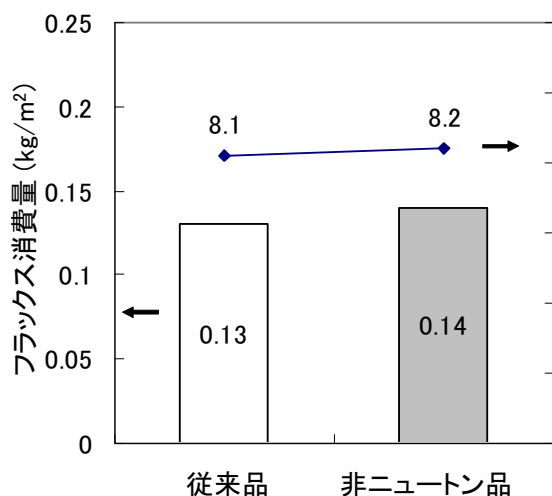


図6 実機実験におけるフラックスの潤滑性

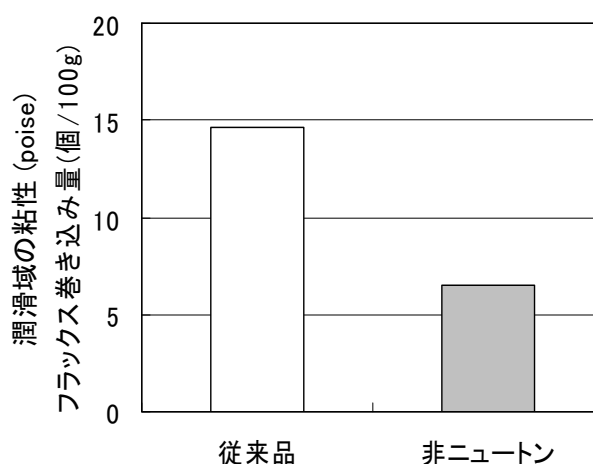


図7 実機実験におけるフラックス巻き込み量

を測定した。窒素を含有することで、非ニュートン化し、巻き込み部に相当するせん断速度域における粘性が、潤滑部に相当するせん断速度域よりも大きくなることを確認した。潤滑域粘性は従来品と同レベル、巻き込み部粘性を従来品より約 10% 高いフラックスを使用して、実機試験を実施した。潤滑の目安であるフラックス消費量は従来品と同程度であるが(図 6)、フラックス巻き込み量は半減させることができた(図 7)。粘度の設計を最適化することで、高潤滑でかつ、難巻き込み化することが可能であり、生産性向上の期待できる結果となった。

第5章 結言

中炭素鋼用のフラックスとして、F や CaO 等シリケートネットワークを切断する成分を2%程度増量することで、モールド側でも結晶化しやすいフラックスとなり、界面熱抵抗が増大、緩冷却化する。そのフラックスを実機に適用することで、鋳片の縦割れ低減、鋳造速度の増加が可能となった。

低炭・極低炭素鋼用フラックスとして、巻き込みを抑制する物性として界面張力も寄与することが分かったが、現実的な粘度、界面張力条件においては、実質的に粘度が支配的であることを明らかにした。

窒素をフラックスへ添加することで、その粘性挙動を非ニュートン化することを確認した。また、このフラックスを使用して実機試験をした結果、巻き込みが低減することを明らかにした。粘度の設計を最適化することで、高潤滑でかつ、難巻き込み化することが可能であり、生産性向上の期待できる結果となった。

以上のように、モールドフラックス設計の最適化で、鋳造の生産性向上が可能であることを明らかにした。

論文審査結果の要旨

本論文は、連続鋳造プロセスの生産性向上の上で必要な鋳造速度の増加のための課題として、鋳片と鋳型間の潤滑不良によるブレークアウトと呼ばれる未凝固溶鋼の外部流出トラブル減少、および製品の品質を確保を目的として、伝熱と流動制御に基づく鋼の連続鋳造用モールドフラックスの組成設計方針について、実験と理論的な解席を組み合わせ指針を与えようとしたものであり、全5章より構成されている。

第1章は緒言であり、鋼の連続鋳造用モールドフラックスの伝熱と流動制御機能に関する課題と本研究の科学的位置付けについて述べると共に、本研究の目的と達成項目を系統的に示した。

第2章は、伝熱の影響による縦割れが問題になる中炭素鋼の連続鋳造を中心に、鋳型内伝熱へ及ぼすモールドフラックスの結晶化挙動の影響について、実験的、理論的に検討したものである。中炭素鋼の縦割れ性欠陥対策として、結晶化しやすいフラックスを使用することで、鋳型内の熱流束を低減・縦割れを抑制することが知られている。本研究では、高塩基度 ($\text{CaO/SiO}_2 > 1.4$) の高結晶化フラックス間での比較を行い、メカニズムを検討の上、実機における評価を行った。溶融フラックスへ熱電対取り付けた水冷銅板を浸漬させる試験を行った結果、塩基度が同程度でも、 CaO 、 F の含有量が高いフラックスは急冷される銅板側においても結晶化しやすいことが分かった。結晶化による収縮に伴い、銅板側表面に凹凸が発現、その結果、銅板とフラックスフィルム間のエアギャップが増大し、界面部の熱抵抗も増大、緩冷却となることを明らかにした。このフラックスを使用して実機にて鋳造試験を実施したところ、鋳型内熱流束は従来より 15～20%低減し、鋳造速度の増速度が可能となった。

第3章は、モールドフラックスの溶鋼中への巻き込みに及ぼすフラックス物性の影響について検討した結果をまとめたものである。低炭・極低炭素鋼においては、その品質上の最大の課題は、フラックスの巻き込みである。フラックスの粘性を増大させることで、その巻き込みを抑制することは、水モデル試験、実機試験にて知られている。一方、連続鋳造の高速化における重要課題となるブレークアウトに関しては、その粘性を小さくする必要があり、これら相反する要求特性の兼ね合いでフラックスの粘性が設計されることになる。そこで、粘度および、溶鋼/フラックス間の界面張力の巻き込みへ及ぼす影響を定量化した。水モデルおよび溶鋼による実験の結果、その巻き込み量を粘度と界面張力に関する相関式で表すことができた。実機で一般的に使用される粘度が $0.5\text{Pa}\cdot\text{s}$ 以下、界面張力が $1200\sim 1300\text{mN/m}$ においては、粘度の影響が支配的であることを明らかにした。

第4章は、難巻き込みフラックスの開発結果について述べたものである。フラックスの潤滑は、鋳片と鋳型の 1mm に満たない隙間にフラックスが流入することにより生じるが、その場所においては、フラックスには大きなせん断速度が生じている。一方、巻き込みは、比較的ゆるやかな溶鋼流やその流れによって生じた渦により巻き込まれる。そこで、せん断速度が小さいときは粘度が高く、大きいときは粘度が低い非ニュートン特性を持たせることで、潤滑と難巻き込みを両立させるフラックスの開発を行った。フラックスに窒素を添加することで、フラックスは非ニュートン化し、巻き込み部に相当するせん断速度域における粘性が、巻き込み部に相当するせん断速度域よりも大きくなることを明らかにした。ラボ鋳造試験により、窒素含有フラックスは、従来品よりも高潤滑でかつ、難巻き込み化することが可能であり、生産性向上が期待できることを示した。

第5章は結論であり、本研究結果を総括した。

以上要するに、本研究は鋼の連続鋳造用モールドフラックスの組成を適切に選択することによって、伝熱と流動特性を制御することが可能であり、連続鋳造プロセスの高速化に資する組成の選択方針に関する科学的根拠を示しており、金属工学の発展に大きく寄与するものである。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。